Beziehungen zwischen Neutroneneinwirkung und künstlicher Radioaktivität

---

Inaugural-Dissertation

zur

Erlangung der Doktorwürde

einer Hohen Naturwissenschaftlichen Fakultät

der Martin Luther-Universität

Halle-Wittenberg

vorgelegt von

Hans Karl Müller

aus Halle (Saale)

Mit 11 Abbildungen und 7 Übersichten

Halle (Saale)

1937

Spezialbetrieb für Dissertationsdruck von Robert Noske in Borna-Leipzig

1. Berichterstatter: Professor Dr. G. Hoffmann
2. Berichterstatter: Professor Dr. K. Ziegler

Tag der mündlichen Prüfung: 17. Februar 1937

R. UNIV.
BIBLIOTHEEK
LEIDEN

Meinem guten Vater in dankbarem Gedenken
und meiner lieben Mutter!

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41548123_0092

Einleitung.

Unmittelbar nach der Entdeckung von Curie und Joliot [1]), daß an einigen leichten Elementen durch Bestrahlung mit α-Teilchen Radioaktivität künstlich erzeugt werden kann, führten Fermi und Mitarbeiter [2]) [3]) [4]) gleichartige Erscheinungen mit Neutronenbestrahlung herbei. Da die Neutronen als ungeladene Teilchen vom Coulomb-Feld der Kernladungen nicht beeinflußt werden, sind ihnen alle Kerne zugänglich. Durch Aufnahme eines Neutrons verliert der Atomverband seine Stabilität und stellt sie nur in gewissen Fällen durch sofortige Ausscheidung eines α- oder H-Teilchens wieder her. Die große Zahl verschieden gebauter Atome, selbst eines Elementes in seinen Isotopen, ergibt die verschiedene Zerfallsneigung zur Aussendung von Positronen oder Elektronen. Die Eintrittswahrscheinlichkeit für die Austauschvorgänge wird durch die Wechselwirkungen zwischen den Ladungen des Gesamtatomes und des ausscheidenden Teilchens und damit durch das Verhältnis der Bindungsenergie eines Teilchens in dem betreffenden Atom zur Energie des eindringenden Neutrons bestimmt. Dagegen ist die Neutronenanlagerung ohne gleichzeitige Wiederherstellung der Atomstabilität viel allgemeiner möglich, besonders auch an schweren Kernen, und ist außerdem bedeutungsvoll durch ihre Eintrittswahrscheinlichkeit. Sie sollte nach den ersten Beobachtungen Fermis hierüber der Neutronengeschwindigkeit umgekehrt proportional sein. Im Verlauf der weiteren Untersuchungen hat sich aber gezeigt, daß die Anlagerungsvoraussetzungen keine so einfache Gesetzmäßigkeit aufweisen, sondern jeweils einem Element — wahrscheinlich seinem

Atomaufbau — eigentümlich sind. Die hierfür entscheidenden Energiebeziehungen in den Kernumwandlungen sind einstweilen nur in dem freiwerdenden Energieanteil der Zerfallsteilchen zu erfassen, da die Atommassen für die Mehrzahl der Isotope noch nicht hinreichend genau bekannt sind.

Es wurde zur Aufgabe erwählt, die Beziehungen zwischen Neutroneneinwirkung und schon bekannten Erscheinungen künstlicher Radioaktivität nachzuprüfen und die Untersuchungen anderer darüber zu ergänzen.

Untersuchungstechnisches.

Schwache Aktivitäten, wie sie naturgemäß in der künstlichen Radioaktivität auftreten, lassen sich entweder an dem Mittelwert der Summenwirkung der ionisierenden Teilchen mit dem Hoffmannschen Duantenelektrometer oder an der Zahl der Einzelwirkungen der stoßenden Teilchen mit dem Elektronenzählrohr von Geiger und Müller messen. Da verhältnismäßig schwache Neutronenquellen die Aktivierung größerer Bleche erforderten, wenn nicht lange Registrierzeiten notwendig werden sollten, wurde das Zählrohr gewählt. Daß es bei richtiger Wahl der Versuchsbedingungen Elektronen quantitativ zu zählen vermag, haben alle darüber angestellten Untersuchungen *) ergeben.

Das für die Messungen benutzte *Zählrohr*, dessen Ausführung auf den im Schrifttum *) enthaltenen Angaben und Erfahrungen beruhte und dessen Längsschnitt in Abb. 1 wiedergegeben ist, hatte einen inneren Durchmesser von 2 cm und eine wirksame Länge von 3 cm. Dafür maßgebend war die Größe der aktivierten Bleche und eine geringe Restteilchenzahl durch Raumstrahlung. Mit Rücksicht auf eine leichte Durchdringbarkeit für die zu messenden β-Teilchen war die Wand aus Aluminium im wirksamen Teil auf 0,15 mm

*) Handb. Phys. XXII/2, 164 (1933) H. Geiger.

abgedreht. Den Rohrenden war zur Sicherung der für den Zählvorgang wichtigen Zylindersymmetrie und zur Erhaltung einer größeren Festigkeit die ursprüngliche Wandstärke gelassen. Als Zähldraht war ein 0,2 mm starker Stahldraht mit Benzin entfettet und mit (1 : 3) verdünnter Salpetersäure oxydiert worden. Die Fugen und Durchführungen waren mit Pizein vergossen, nachdem sich Paraffin-Kollophonium-Gemische, vielleicht infolge Kristallbildung, als ungeeignet erwiesen hatten. Um zur Erprobung der günstigsten Betriebsbedingungen des Zählrohres eine Änderung

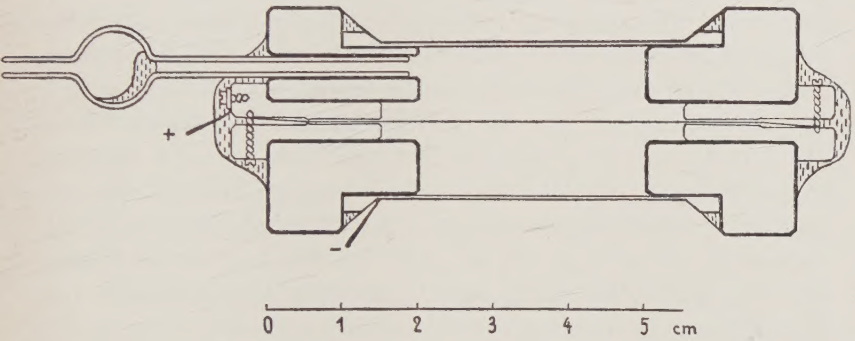

Abb. 1.
Zählrohr im Längsschnitt.

des Gasinhaltes vornehmen zu können, war der sonst übliche Abschmelzverschluß durch einen Pizeinverschluß ersetzt. Er bestand aus einer kugelförmigen Erweiterung des gläsernen Auspumpansatzes. In ihr wurde zuvor eingebrachtes Pizein (kleine Späne) bei entsprechender Lage während des Auspumpens mit einer kleinen Gasflamme von außen erweicht, so daß es bei Erreichen des gewünschten Gasdruckes durch Neigen des Ganzen leicht vor die innere Rohrmündung gebracht werden und diese so verschließen konnte. Ebenso ließ sich die verschließende Pizeinschicht leicht mit einer heißen

Nadel durchstechen und so der Verschluß beliebig oft aufheben und wiederherstellen.

Als günstigster Luftdruck im Zählrohr ergab sich 50 mm Quecksilber. Unter diesen Verhältnissen arbeitete das Zählrohr etwa ein halbes Jahr einwandfrei und gleichmäßig.

Als *Hochspannungsquelle* für das Zählrohr wurde ein Hochspannungs-Gleichrichter benutzt. Die Hochspannung lieferte ein Transformator *) bis zur Höhe von 1500 Volt bei einer größten Belastbarkeit mit 5 Milliampère. In seinem Primärstromkreis lag ein Drehwiderstand **) mit 10 000 Ohm. Seine besondere Ausführung mit vielen und langen Windungen eines Drahtes von verhältnismäßig geringem spezifischen Widerstand sowie mit einem scharfen Schleifkontakt gestattete eine gleichmäßige, sehr feinstufige Regelung der Hochspannung um jeweils etwa 10 Volt bis auf 700 Volt herab. Für die Heizung der Gleichrichterröhre war ein eigener Transformator mit entsprechend hochspannungssicherem Aufbau angefertigt worden. Als Glühkathoden-Gleichrichterröhre wurde die Type „2 W" der Firma Preßler (Leipzig) benutzt. Als Ausgleichs- und Glättungskapazität im Hochspannungsausgang des Gleichrichters diente ein Hochspannungskondensator mit 1 μF. Seine schnelle Einstellung bei Spannungswechsel oder Entladung nach Abschalten besorgte eine Widerstandsüberbrückung mit 40 Megohm (Dralowid).

Die *Zählstromstöße* wurden durch einen batteriegespeisten Röhrenverstärker der dafür üblichen Schaltung einem Lautsprecher — zur dauernden Überwachung — und über ein Relais einem Fernsprechzählwerk zugeführt. Dieses war durch Auswechslung der ursprünglichen Spule gegen zwei Lautsprecherspulen von je 1000 Ohm und durch Betrieb mit einer Spannung von 80 Volt erheblich empfind-

---

*) Von der Firma Görler, Berlin, besonders angefertigt.

**) Von der Firma Preh, Neustadt (Saale).

licher, d. h. schneller trennend, geworden. Das Auflösungsvermögen betrug $^1/_8$ Sekunde, so daß erst von mehr als 100 Teilchen je Minute ab eine Berichtigung der Zählungen erforderlich war, und genügte vollkommen bei den auftretenden Teilchenzahlen. Die Trennfähigkeit des Relais war erheblich größer als die des Zählwerkes und brauchte daher nicht besonders berücksichtigt zu werden.

Die für die vollständige Teilchenerfassung notwendige *Zählrohrspannung* wurde nach Gehör in der Weise eingestellt, daß mit einem Uran-X-Präparat*) gleiche Teilchenanzeige in Lautsprecher und Zählwerk herbeigeführt wurde. Wenn nämlich die Spannung nicht hoch genug ist, bleibt ein Teil der Zählstromstöße zu schwach, um das Relais des Zählwerkes auszulösen, und ist infolgedessen nur im Lautsprecher wahrzunehmen. Die Stetigkeit der Spannung war befriedigend.

Die *Restteilchenzahl* des bleigeschirmten Zählrohres betrug 10 bis 12 in der Minute und wurde vor und nach jeder Meßreihe nachgeprüft.

Die *Teilchenzählungen* wurden jede halbe Minute abgelesen, und die so gewonnenen Zahlenreihen über das Abklingen der Radioaktivität oder die Veränderung der Teilchenzahl unter den verschiedenen Versuchsbedingungen wurden zunächst, soweit erforderlich, berichtigt und dann von der statistischen Schwankung durch Randmittelbildung weitgehend befreit. Die Bestimmung der Anfangsteilchen-

---

*) Etwa 300 g Uranylnitrat — $UO_2(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ — waren in Äther geschüttelt und gelöst worden. Nach einem Tag wurde das Kristallwasser, in dem sich praktisch das gesamte Uran-X befindet, aus dem Scheidetrichter abgezogen, nach Entfernen des darin gelösten Äthers mit Wasser verdünnt und dann mit zerfasertem Fließpapier mehrere Stunden gekocht, wobei das Uran-X leicht adsorbiert wird. Die Papierfasern wurden abfiltriert und verascht. Die Asche war beträchtlich β-aktiv. Durch Absorptionsmessung und Verfolgung der Abklingungszeit konnte die Strahlung als die β-Strahlung des Uran-X bestimmt werden.

zahlen der verschieden schnell zerfallenden Kerne eines Elementes erfolgte auf zeichnerischem Wege aus der Darstellung des Abklingungsverlaufes mit logarithmischem Ordinatenmaßstab.

Für die *Neutronenerzeugung* wurde teils Radium, teils Radium-Emanation zusammen mit Beryllium-Oxyd verwendet. Die Anwendung von Radium ist durch dessen praktisch gleichbleibende Strahlung (nach Eintritt des Gleichgewichtes mit den Folgestoffen) für genaue und wiederholte Messungen auch bei längeren Bestrahlungszeiten ganz besonders geeignet. Dagegen werden bei Benutzung von Radium-Emanation mit ihrer verhältnismäßig kurzen Lebensdauer sicher beträchtliche Veränderungen im Spektrum der Neutronenquelle durch Aufbau und Abbau des Gleichgewichtes der erzeugenden Strahlungsbestandteile eintreten und sich bei längeren Benutzungszeiten störend bemerkbar machen können. Daher wurde Radium-Emanation nur für Ergänzungs- und Vergleichsmessungen herangezogen, weil davon eine größere Gleichgewichtsmenge als Radium zur Verfügung stand. Wie schon in der Arbeit von Döpel [5]) über ein Eichverfahren für Neutronenquellen, wurde auch hier zur Erzielung einer möglichst großen Ausbeute eine innige Verbindung zwischen α-Strahler und dem neutronenabgebenden Stoff gesucht. Zu diesem Zweck wurde wegen seiner außerordentlichen Feinpulvrigkeit Beryllium-Oxyd gewählt, während im allgemeinen pulverisiertes, metallisches Beryllium angewendet wird. Die dadurch erreichte Ausbeutesteigerung läßt sich nicht abschätzen, sondern könnte nur durch Vergleichsmessungen bestimmt werden. Zur verlustfreien und leichten Anfertigung der Neutronenquelle sollte das Beryllium-Oxyd *) (1 g) in einem etwa 1 mm wandstarken und 8 mm weiten Glasröhrchen eingebracht und dann mit 2 mg Radium in der handelsüblichen, wässerigen Chlorid-Lösung

*) „wasserfrei, reinst" von E. Merck, Darmstadt.

durchfeuchtet werden. Nach vollendeter Durchfeuchtung sollte mit einigen Tropfen äquivalenter Schwefelsäure das Radium-Chlorid in die nach der Kristallbildungsenergie feinstmögliche Form, das Radium-Sulfat, übergeführt werden. Dadurch sollte es in denkbar feiner Verteilung im Beryllium-Oxyd festgelegt und die mit der Wahl eines anderen Salzbildners verbundene Gefahr einer späteren Zusammenballung zu größeren Kristallgebilden verhütet werden *). Die Wasser- und Säurereste konnten durch abschließendes Ausheizen bis auf 450° C völlig entfernt werden. Ein im Boden des Röhrchens eingeschmolzener, etwa 0,02 mm starker Platindraht und eine Lage Platinasbest zwischen den bewegungssperrenden Asbestscheiben unter dem hakenförmig ausgebildeten Abschmelzverschluß vervollständigten die Fassung **). Die andere Neutronenquelle enthielt Radium-Emanation ***), deren γ-Strahlung mit der von 30 bis 10 mg Radium im Gleichgewicht stand, und ebenfalls Beryllium-Oxyd.

Die Untersuchungen wurden, um gut meßbare Intensitäten zu erhalten, auf Rhodium, Silber und Kupfer beschränkt. Diese Stoffe wurden in Gestalt von halbzylindrisch gebogenen, flächengleichen (4×5 cm^2) Blechen ****) im festen Abstand von 1,5 cm von der Neutronenquelle in Luft oder in der Mitte von wassergefüllten Gefäßen (Abb. 2) bestrahlt. Dann wurden sie mit dem festen Abstand von 3 mm auf das Zählrohr aufgelegt. Die Teilchenzählung begann 10 Sekunden nach beendeter Bestrahlung.

---

*) Für die diesbezügliche Auskunft sei Herrn Dr. H. Stamm vom Chemischen Institut auch an dieser Stelle nochmals bestens gedankt.

**) Sie wurde in einwandfreier Weise von der Radium-Chemie-A.G., Frankfurt (Main) ausgeführt.

***) Sie wurde in dankenswerter Weise aus einem 100-mg-Radium-Leih-Präparat der Deutschen Forschungsgemeinschaft durch Herrn Dozent Dr. H. Pose überlassen.

****) Die Rhodium- und Silberbleche waren rein und gewalzt von der Firma „Edelerz" Dr. W. Franke, Frankfurt (Main), angefertigt. Das Kupfer war Walzblech des Handels.

Untersuchungsziele.

Die Untersuchungen galten der Abhängigkeit der künstlichen Radioaktivität von der Zeitdauer, von der Intensität der Neutroneneinwirkung und von der Filterung der Neutronen und endlich der Energie der Zerfallsteilchen zur Deutung der möglichen Kernumwandlungsvorgänge.

1. Die *Bestrahlungsdauer* zu verändern, wurde dadurch nahegelegt, daß eine Neutronenquelle mit Radium zur Verfügung stand. Das Radium mit seinen Folgestoffen liefert nach Eintritt des Gleichgewichtes durch seine praktisch gleichbleibende Strahlung einen stetigen Neutronenstrom, dessen Wirkungen nicht den bei Benutzung schnellabklingender Strahlungsquellen unvermeidlichen, unsicheren Berichtigungsrechnungen unterworfen werden müssen. Mittels dieses stetigen Neutronenstromes lassen sich in der Bildung eines künstlich-radioaktiven Stoffes die gleichen Voraussetzungen erfüllen, die für einen aus einer praktisch gleichbleibenden Menge der Muttersubstanz entstehenden natürlich-radioaktiven Stoff bestehen. Wie dort, so ergibt sich auch hier ein zeitlicher Anstieg zum Grenzwert der Gleichgewichtsmenge zwischen entstehenden und zerfallenden Atomen. Da er, wie schon die Beobachtungen von Rutherford und Soddy *) an Uran und Thorium ergeben hatten, das Spiegelbild zum Abklingungsverlauf nach Ende der Neubildung instabiler Kerne darstellt, läßt er gleichfalls die Zerfallszeiten erkennen. Diese Tatsache ist dann besonders wertvoll, wenn trotz verhältnismäßig schwacher Aktivitäten noch längere Halbwertszeiten wahrgenommen werden sollen. Sie sind im Anklingungsverlauf durch die größere Anfangsaktivität, im Abklingungsverlauf dagegen durch die geringste Teilchenzahl vertreten, die bei schwachen An-

*) Phil. Mag. (6) 4, 370 u. 569 (1902).

fangsaktivitäten vielfach in der statistischen Schwankung der Restteilchenzahl untergeht.

Aus diesen Gründen wurden auch die Anklingungskurven der Stoffe aufgenommen. Im Interesse einer möglichst großen Aktivität wurden diese in der Mitte eines mit Wasser gefüllten Gefäßes (Abb. 2) verschieden lange be-

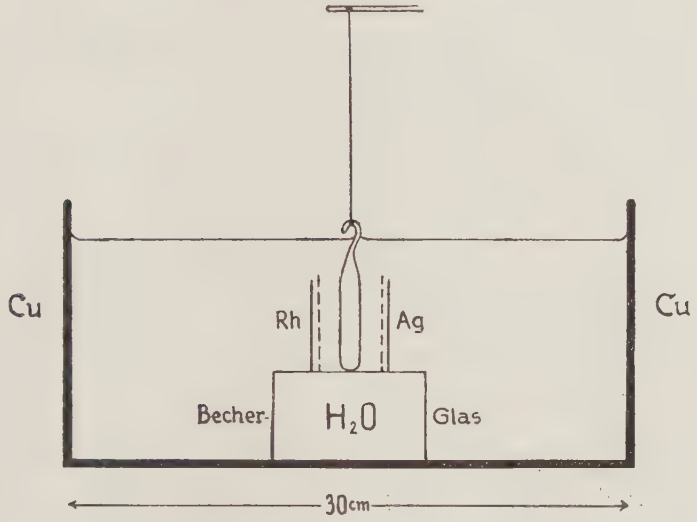

Abb. 2.
Bestrahlungsanordnung in Wasser.

strahlt. Die Bestrahlungszeiten wurden von 1 Minute bis zu 24 Stunden gesteigert. Nach jeder Bestrahlung wurde der Abklingungsverlauf über 5 Minuten verfolgt und daraus auf die Anfangsteilchenzahl bei Beendigung der Bestrahlung extrapoliert. Die Anfangsteilchenzahl wurde für jede Bestrahlungsdauer 10mal ermittelt und für 24stündige Bestrahlung jeweils gleich 100 gesetzt.

Da aber die kurzen Zerfallszeiten sicherer und leichter aus den Abklingungskurven zu entnehmen sind, wurden auch diese bei einer Bestrahlungsdauer von 12 Minuten aufgenommen und in der üblichen Weise bei logarithmischem Ordinatenmaßstab ausgewertet. Diese Halbwertszeiten möglichst genau zu bestimmen, wurde wegen der teilweise noch ungleichen Angaben der einzelnen Forscher darüber für notwendig gehalten.

2. Die *Intensität* der Neutronenquelle mit Radiumemanation war naturgemäß veränderlich. Das Neutronenspektrum dieser Quelle erleidet sicher durch den Aufbau und Abbau des Gleichgewichtes innerhalb der Benutzungsdauer Verschiebungen seiner Zusammensetzung; abgesehen davon ist es sehr gruppenreich. So haben Dunning und Pegram *) aus Reichweiten der Rückstoßprotonen 0,5 — 1,5 — 4,8 — 6,5 — 8,0 — 12,5 und 14,2 MeV als auftretende Energiegruppen einer Beryllium - Radiumemanation - Neutronenquelle bestimmt, da nicht nur die 3 α-Strahlengruppen für die Neutronenerzeugung wirksam sind, sondern nach Feststellungen von Szilard und Chalmers **) auch die γ-Strahlung. Außerdem tragen nicht alle Energiegruppen zur Aktivierung bei. Es kann also nicht unbedingt mit Proportionalität zwischen dem aus der Eichmessung abgeleiteten jeweiligen γ-Äquivalentwert der Emanationsmenge und der erhaltenen Aktivität gerechnet werden.

Die Änderung des Neutronenstromes wurde an der wie zuvor eingeleiteten Aktivität bei gleichbleibender Bestrahlungsdauer von 12 Minuten verfolgt, und wieder jedesmal die Anfangsteilchenzahl aus der Abklingung während der ersten 5 Minuten nach beendeter Bestrahlung ermittelt.

3. Die *Filterung* der Neutronen, die zum erstenmal von Fermi und Mitarbeitern [6] [7]) mit wasserstoffhaltigen Stoffen durchgeführt wurde, ergibt infolge der Massenwechselwir-

*) Phys. Rev. (2) 45, 295 (1934) Nr. 4.

**) Nature 134, 494 (1934) Nr. 3387.

kungen zwischen den annähernd massengleichen Protonen und Neutronen die Möglichkeit einer starken Geschwindigkeitsverminderung der Neutronen. Dabei zeigt sich, daß die Wahrscheinlichkeit für die einzelnen Kernumwandlungen, anscheinend durch das jeweilige Kerngefüge bedingt, an bestimmte Neutronenenergien geknüpft ist. Daher wurde zunächst durch verschieden dicke Wasserschichten die Veränderlichkeit der Aktivierungseigenschaften der Neutronen untersucht. Die verschiedenen Wasserschichten wurden durch verschieden weite, mit Wasser gefüllte Gefäße erhalten. Jeweils in der Mitte hing die Neutronenquelle an einem Gummifaden. Die Bleche wurden zur Bestrahlung in 1,5 cm Abstand um sie herum auf Paraffinstücken oder einem umgestülpten Glasgefäß aufgestellt. Für die Vergleichsbestrahlung in Luft diente eine dünnwandige Eisenblechdose als Unterlage. Die Bestrahlungszeit betrug für alle Messungen einheitlich 15 Minuten. Die aus dem Abklingungsverlauf ermittelten Anfangsteilchenzahlen des einzelnen Umwandlungsvorganges wurden in Abhängigkeit zu dem Wasserradius gebracht, bei dem die Bestrahlung stattgefunden hatte.

Weitere Untersuchungen bezogen sich auf die Filterwirkung der aktivierten Metalle selbst. Denn es hat sich gezeigt, daß in Verbindung mit der Bevorzugung bestimmter Neutronenenergien in den Kernumwandlungen diese von dem betreffenden Element ausgesiebt werden.

Die Bestrahlung dazu wurde unter Vorschaltung anderer Bleche auf der Seite der Neutronenquelle in der Mitte des mit Wasser gefüllten Gefäßes (Abb. 2) ausgeführt, bei dessen Wasserradius vorher die Aktivierung die größte Steigerung erreicht hatte. Diese große Wasserhülle scheidet auch Winkeleinflüsse in der Bestrahlung am ehesten aus. Die eintretenden Veränderungen der Aktivitäten wurden in Hundertteile der in Wasser allein jeweils erreichten größten Aktivität umgerechnet.

4. Die *Energie der Zerfallsteilchen* wurde bestimmt, um durch einen Einblick in die energetischen Beziehungen der Kernumwandlungen zugleich sie selbst eher deuten zu können, soweit das ohne Kenntnis genauer Isotopenmassen überhaupt möglich ist.

Zur Bestimmung der Energie wurden mit Aluminiumfiltern zwischen aktiviertem Blech und Zählrohr die Absorptionskurven aufgenommen, und zwar durch die schon beschriebene Zerlegung aus dem Abklingungsverlauf für die Teilchen der einzelnen zerfallenden Isotope. Aus den gewonnenen Absorptionskoeffizienten bzw. Halbwertsdicken wurden die Energien mittels der Tabellen Meyers und von Schweidlers *) bestimmt.

Untersuchungsergebnisse.

Rhodium. Die bei verschiedenen Bestrahlungszeiten ermittelten Anfangsteilchenzahlen ergaben den in Abb. 3 dargestellten Anklingungsverlauf. Nach einem raschen Anstieg innerhalb der ersten Minuten erfährt die Aktivität durch längere Bestrahlungsdauer bis zu 24 Stunden einen geringen Zuwachs, der danach noch geringer wird, so daß er bei der verfügbaren Stärke der Neutronenquelle nicht mehr sicher zu verfolgen war. Das Gleichgewicht wird also erst jenseits einer 24stündigen Bestrahlung erreicht. Demnach enthält die Strahlung des Rhodiums gemäß der Bildungsregel für das Gleichgewicht neben Bestandteilen mit verhältnismäßig kurzen Halbwertszeiten einen schwach vertretenen mit einer Halbwertszeit in der Größenordnung eines Tages. Anderweitig konnten darüber noch keine Angaben gefunden werden.

Die Auswertung der zahlreich aufgenommenen Abklingungskurven ergab für die beiden kürzeren Halbwertszeiten

*) „Radioaktivität" S. 631 (bei B. G. Teubner 1927).

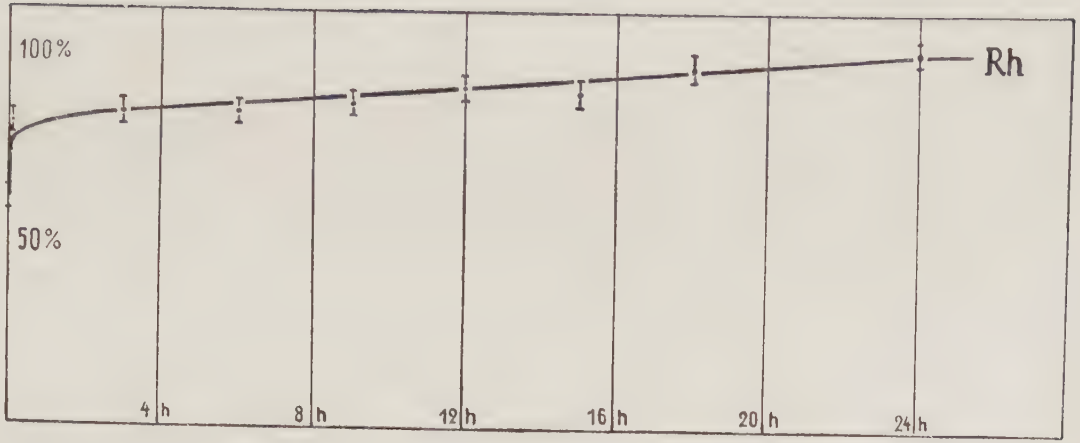

Abb. 3.
Anklingungsverlauf, Ord.: Anfangsaktivität; Abs.: Bestrahlungsdauer.

35 Sekunden und 3,8 Minuten. Diese Werte stimmen mit den letzthin von Döpel [5]) ermittelten überein. Fermi und seine Mitarbeiter [8]) [9]) [10]), sowie Tillman und Moon [11]) [12]) [13]), geben 44 Sekunden und 3,9 Minuten an und haben diese Zahlen bisher nicht geändert. Die beiden Werte 3,8 und 3,9 Minuten liegen innerhalb der Fehlergrenze. Aber der Unterschied bei der kurzen Halbwertszeit von 35 zu 44 Sekunden ist so groß, daß er kaum noch als Ergebnis von Meßungenauigkeiten oder Erscheinungsunschärfen angesehen werden kann. Da in diesen wie in den Untersuchungen Döpels Rhodiumblech der gleichen Herkunft *) und sicher auch der gleichen Fertigung (hartblank gewalzt) verwendet wurde, könnte die Ursache für den Unterschied in herkunftsbedingten Verschiedenheiten der Anteile von Fremdelementen, wie sie auch von Hevesy **) für Unterschiede der an seltenen Erden beobachteten Halbwertszeiten annimmt, oder in fertigungsbedingten Gefügeverschiedenheiten liegen. Empfindlichkeitseigenarten der für die Bestimmung der verschiedenen Halbwertszeiten benutzten Meßverfahren können kaum vorliegen, da den beiden verschiedenen Werten sowohl Ionisationsmessungen mit Elektrometer als auch Teilchenzählungen mit Zählrohr zugrunde liegen. In Übers. 1 sind die einzelnen Angaben über die Halbwertszeiten des Rhodium zusammengestellt.

Übersicht 1.

E. Fermi und Mitarbeiter	50 sec;	5 min [7]) [14])
E. Fermi und Mitarbeiter	44 sec;	3,9 min [8]) [9]) [10]) [15])
P. B. Moon und J. R. Tillman	44 sec	[11]) [12]) [13])
E. R. Gaerttner u. a.	44 sec	[16])
H. H. Goldsmith u. F. Rasetti	44 sec;	3,9 min [17])
R. Döpel	35 sec;	3,8 min [5])
H. K. Müller	35 sec;	3,8 min
	±1	±0,1

*) „Edelerz" Dr. W. Franke, Frankfurt (Main).

**) Nature 137, 185 (1936) Nr. 3457.

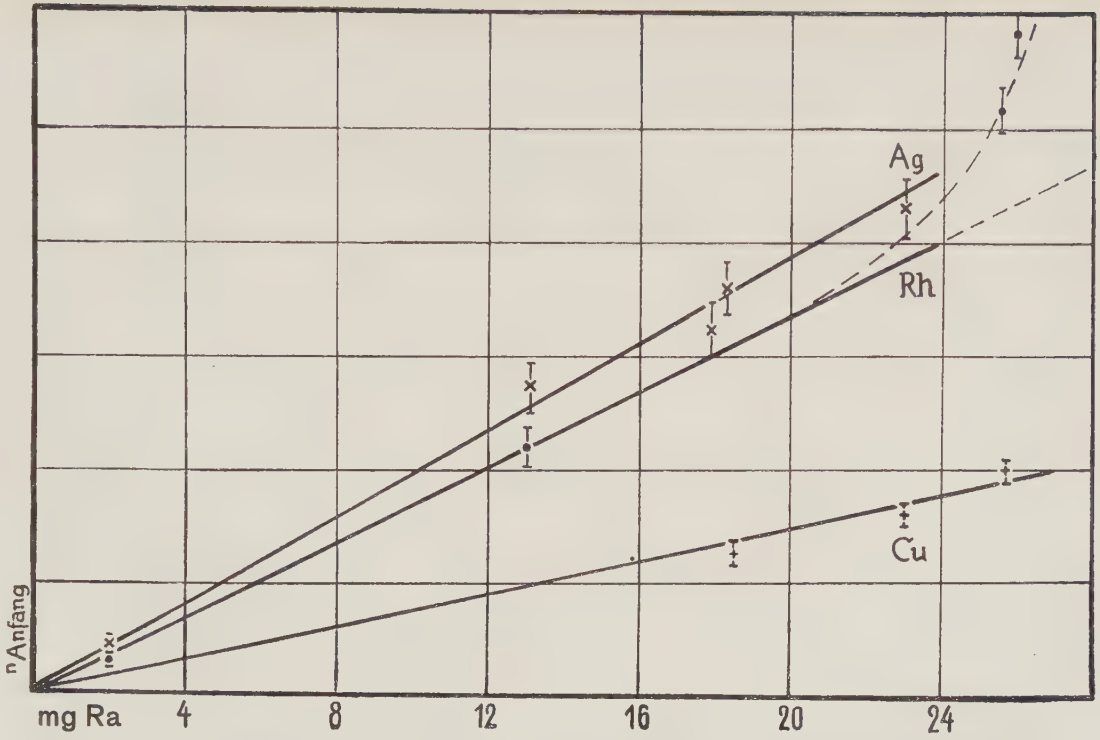

Abb. 4. Abhängigkeit von der Stärke der Neutronenquelle in γ-Äquivalent der Emanation.

Die Bestrahlung mit der Emanations-Neutronenquelle im Verlauf ihrer Abklingung hatte das in Abb. 4 mit willkürlichem Maßstab für die einzelnen Aktivitäten wiedergegebene Ergebnis. Es läßt, vielleicht infolge der höheren Aktivierbarkeit des Rhodiums, den Schluß zu, daß die gemessene oder aus der Abklingungszeit dann berechnete γ-Strahlung der Emanation in einer Neutronenquelle kein richtiges Maß für die während der Emanationsabklingung auftretenden Neutronen gibt. Zwischen der γ-Strahlung und der herbeigeführten Aktivität besteht offenbar kein festes Verhältnis. Dies ist besonders beachtenswert, weil meist Neutronenquellen mit Emanation zur Anwendung kommen. Nach Abschluß dieser Untersuchungen wurde festgestellt, daß Amaldi und Fermi *) in ihrer zusammenfassenden Darstellung der Absorption und Diffusion langsamer Neutronen ebenfalls darauf hingewiesen haben. Dadurch erweist sich das von Döpel [5]) vorgeschlagene Verfahren zur Eichung von Neutronenquellen mittels der durch ihre Neutronen bewirkten Aktivität eines geeigneten Stoffes als notwendig.

Die Untersuchung der Wasserwirkung auf die Aktivierungseigenschaften der Neutronen führte zu dem in Abb. 5 und Übers. 2 dargestellten Ergebnis. Die 35-Sekunden-Aktivität wurde bis auf das 25fache gegenüber Luft durch einen Wasserradius von 15 cm erhöht, während an dem Bestandteil mit 3,8 Minuten Halbwertszeit schon 4 cm Wasserradius zur größten Steigerung der Aktivität um das 37fache führten. Im einzelnen entspricht die Zunahme der Neutronenwirkung derjenigen, die von Fleischmann [15]) bei der Untersuchung der durch verlangsamte Neutronen in wasserstoffhaltigen Stoffen ausgelösten γ-Strahlung gefunden wurde. Damit wird die dort gegebene Deutung bestätigt, daß erst eine bestimmte Bremsschicht durchlaufen sein muß, bevor die Neutronen anlagerungsfähig werden. Die schon

*) La Ric. Scientifica 7 (2), Bd. 1, Nr. 11/12 (1936).

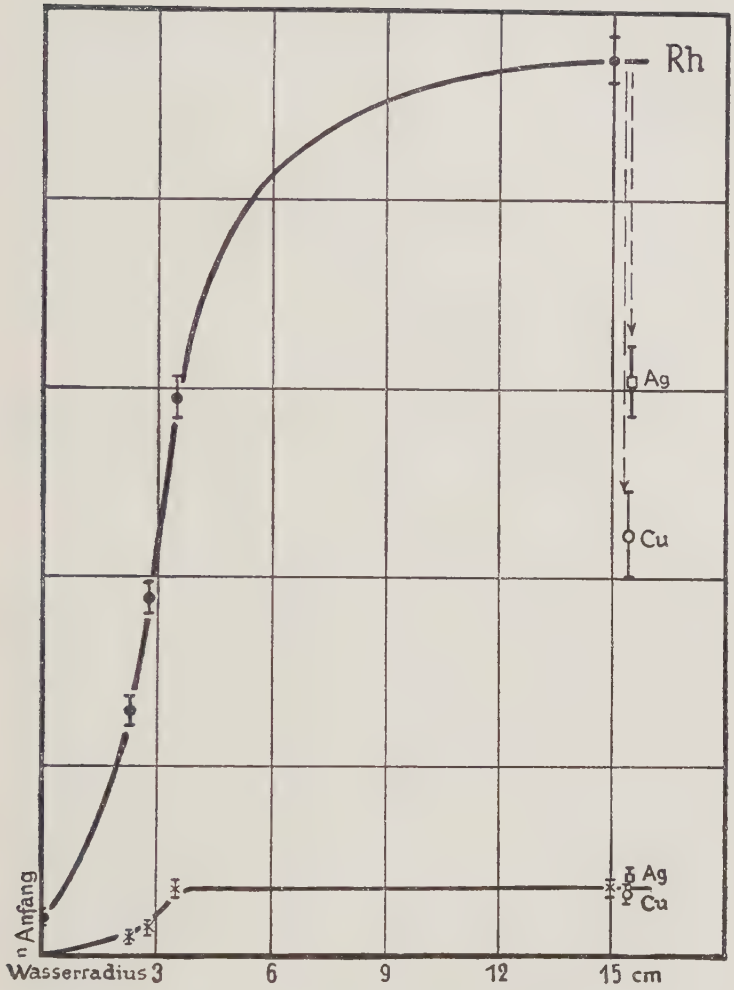

Abb. 5.
Wasserwirkung.

unterhalb dieser Schichtdicke erfolgenden Neutronenverbindungen mit Kernen sind auf die bereits aus der Neutronenquelle langsam hervorgehenden Neutronen beschränkt. Im Unterschied zur Vorwärtsanordnung strebt die hier angewendete Rückwärtswirkung der Filter einem Grenzwert zu, weil mit der Verlangsamung der Neutronen auch die Anlagerungsfähigkeit an den Filterstoff zunimmt und damit die Rückkehrwahrscheinlichkeit abnimmt.

Übersicht 2.

Filter	Anf.-Akt.	Änderung
H_2O — cm	19 : 1	1 : 1
2,3 cm	129 : 10	7 : 10
2,8 cm	189 : 15	10 : 15
3,5 cm	294 : 37	16 : 37
15,0 cm	476 : 37	25 : 37
+ Ag 0,053 cm	289 : 42	− 39 % : +14 %
+ Cu 0,052 cm	223 : 34	− 53 % : − 8 %

Von Fermi und Mitarbeitern [6] [8]) wird als „Wasserstoffaktor" für den Körper mit der 44-Sekunden-Halbwertszeit „15" angegeben, während für den Körper mit 3,9 Minuten Halbwertszeit keine Angabe vorliegt. Diesen Wert haben sie durch Neutronenfilterung mit Paraffin in Vorwärtsanordnung gewonnen. Ein unmittelbarer Vergleich der unter verschiedenen Versuchsbedingungen erhaltenen Aktivierungsfaktoren ist wohl nicht möglich, da sie abhängig sind von der Filteranordnung und von den jeder Neutronenquelle eigentümlichen Neutronengruppen.

Die größte in Wasser allein erhaltene Aktivität mit 35-Sekunden-Halbwertszeit verringerte sich durch Vorschaltung eines Silberbleches $\left(0{,}053\ \text{cm}/\frac{0{,}5565\,\text{g}}{\text{cm}^3}\right)$ um 39 %, dagegen nahm die des längerlebigen Teiles noch um 14 % zu. Für die Gesamtwirkung beider Strahlungsteile besteht somit Übereinstimmung mit der Feststellung Ehrenbergs [19]), daß die

Rhodiumaktivität durch einen Silberfilter um $0 \pm 2{,}5\%$ verändert wird. Tillman und Moon [12]) finden, zwar in anderer Versuchsanordnung, für die kurze Rhodiumaktivität mit Silberfilter $0{,}69 \pm 0{,}025$, in beträchtlicher Nähe des hier ermittelten Wertes, und mit Kupferfilter $0{,}8 \pm 0{,}04$. Dagegen erfuhr hier die mit 35-Sekunden-Halbwertszeit abklingende Aktivität durch ein Kupferblech $\left(0{,}052\ \text{cm}/\frac{0{,}4644\ \text{g}}{\text{cm}^2}\right)$ eine Verminderung um 53% und ebenfalls die 3,8-Minuten-Aktivität eine um 8%. Die Aktivierungsveränderungen durch Gegenwart dieser Filter sind in Abb. 5 mit eingezeichnet.

Die Absorptionskurven für die Teilchen der beiden Zerfallsvorgänge sind in Abb. 6 wiedergegeben. Ihre gegenseitige Lage ist aus Übersichtlichkeitsgründen willkürlich. Die aus ihnen ermittelten Energien sind in Übers. 3 zusammengestellt.

Für die Teilchen der 35-Sekunden-Halbwertszeit wurde eine mittlere Energie von $0{,}80 \cdot 10^6$ eV ermittelt aus einer Halbwertsdicke von 0,053 cm Al und einem Absorptionskoeffizienten $\mu = 13{,}09\ \text{cm}^{-1}$ Al in guter Übereinstimmung mit den kürzlich veröffentlichten Elektronenspektren von Gaerttner u. a. [16]), die mit der Nebelkammer im Magnetfeld aufgenommen wurden. Unter den auftretenden Elektronen macht sich ein erheblich weicherer Strahlungsanteil bemerkbar, wahrscheinlich die von Fermi beobachtete γ-Strahlung, mit einer Energie von $0{,}27 \cdot 10^6$ eV, entsprechend einer Halbwertsdicke von 0,0145 cm Al und einem Absorptionskoeffizienten $\mu = 47{,}79\ \text{cm}^{-1}$ Al. Döpel gibt für die Rhodiumzerfallsteilchen beider Abklingungszeiten 0,45 mm Al als Halbwertsdicke an. Demgegenüber wurde für die mit der Halbwertszeit von 3,8 Minuten ausgesandten Teilchen aus einer Halbwertsdicke von 0,142 cm Al der Absorptionskoeffizient $\mu = 4{,}90\ \text{cm}^{-1}$ Al bestimmt, entsprechend einer Energie von $1{,}59 \cdot 10^6$ eV. Für die Teilchen dieses Zerfalls haben Fermi und Mitarbeiter [14]) $0{,}8 \cdot 10^6$ eV als Energie angegeben.

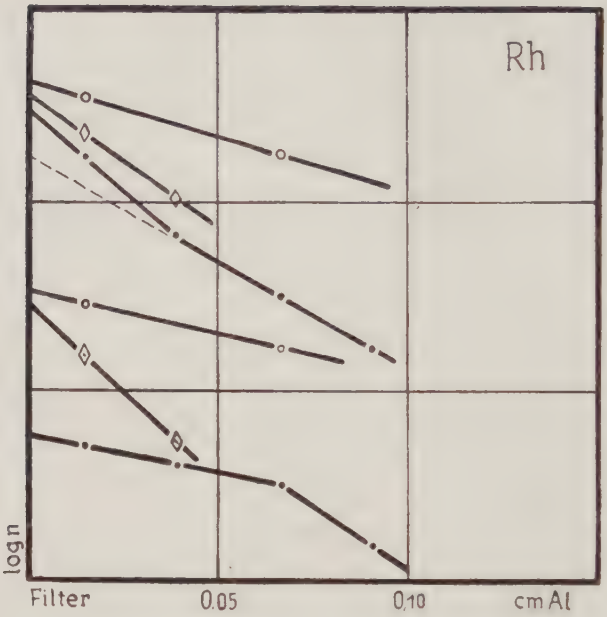

Abb. 6.

Absorption der Elektronen.

—•— u. —○— kurz
—•— u. —○— lang mit verschiedener Neutronenquelle.

—◇— kurz
—◇— lang mit Silberfilter.

Übersicht 3.

Zerfall:	Halbwertsdicke	Abs.-Koeff.	Energie
Rhodium 35″	0,053 cm Al	13,09 cm^{-1} Al	$0{,}80 \cdot 10^6$ eV
	0,0145 cm Al	47,79 cm^{-1} Al	$0{,}27 \cdot 10^6$ eV
(Ag)	0,041 cm Al	16,9 cm^{-1} Al	$0{,}64 \cdot 10^6$ eV
Rhodium 3,8′	0,142 cm Al	4,90 cm^{-1} Al	$1{,}59 \cdot 10^6$ eV
(Ag)	0,032 cm Al	21,66 cm^{-1} Al	$0{,}51 \cdot 10^6$ eV

Bemerkenswert ist die Erscheinung, daß sich für die Teilchen aus der Bestrahlung in Gegenwart des Silberfilters eine geringere Energie ergab, und zwar für den schnellabklingenden Anteil eine Energie von $0{,}64 \cdot 10^6$ eV und für den langsamzerfallenden $0{,}51 \cdot 10^6$ eV.

Die Kenntnis der Energie der Zerfallsteilchen kann in Verbindung mit genauen Isotopenmassen eine Entscheidung darüber herbeiführen, welche Kernvorgänge sich wirklich abspielen, und welche Neutronenenergien darin entscheidende Wirkung ausüben. Da aber für die hier in Betracht kommenden Elemente solche genauen Isotopenmassen noch nicht bekannt sind, muß eine vorläufige Deutung der den beobachteten Erscheinungen zugrunde liegenden Vorgänge auf einem anderen Wege versucht werden.

Es entspricht einer allgemeinen Gesetzmäßigkeit im β-Zerfall der natürlich-radioaktiven Elemente, daß bei größerem Verhältnis von Kernmasse zu Kernladung die größere Zerfallsneigung besteht, also die kürzere Halbwertszeit auftritt. Unter Annahme dieser Regel auch für künstlich-radioaktive Kerne würden sich für Rhodium, ähnlich der von Madsen [20]) für Kupfer und der von Szilard und Chalmers [21]) für Indium angenommenen Möglichkeit mehrerer Umwandlungen des gleichen Kernes, folgende zwei verschiedenen Kernumwandlungen ergeben:

$$^{103}_{45}\mathrm{Rh} + ^{1}_{0}\mathrm{n} \rightarrow ^{103}_{44}\mathrm{Ru} + ^{1}_{1}\mathrm{H}^{\uparrow} \rightarrow ^{103}_{45}\mathrm{Rh} + {}_{-}\mathrm{e}\ (+\gamma)$$

mit der kurzen und

$$^{103}_{45}\mathrm{Rh} + ^{1}_{0}\mathrm{n} \rightarrow ^{104}_{45}\mathrm{Rh} \rightarrow ^{104}_{46}\mathrm{Pd} + {}_{-}\mathrm{e}$$

mit der langen Halbwertszeit, da nur das eine beständige Rhodiumatom bekannt ist. Die Untersuchungsergebnisse würden sich damit vereinbaren lassen. Sie zeigen für den kurzlebigen Anteil eine verhältnismäßig geringere Begünstigung durch Verlangsamung der Neutronen und sogar bei weiterer Abbremsung der Neutronen durch ein Silber- oder

Kupferfilter eine Verminderung auf etwa die Hälfte der in Wasser allein erreichten Bildungswahrscheinlichkeit. Andererseits bleibt der Teil mit der größeren Halbwertszeit dadurch unbeeinflußt und weist die erheblich stärkere Begünstigung durch Neutronenverlangsamung in Wasser auf. Die in dem Anfangsverhältnis der Teilchenzahlen bestehende Ungleichheit braucht nicht durch verschiedene Eintrittswahrscheinlichkeit der beiden Umwandlungen begründet zu sein, sondern könnte in einem geteilten Zerfall

$$^{103}_{45}\mathrm{Rh} + ^{1}_{0}\mathrm{n} \rightarrow ^{104}_{45}\mathrm{Rh} \begin{matrix} \nearrow\ ^{104}_{46}\mathrm{Pd} + {}_{-1}\mathrm{e} \\ \searrow\ ^{100}_{43}\mathrm{Ma} + ^{4}_{2}\mathrm{He} \end{matrix}$$

ihre Ursache haben, von dem sich der α-Strahlen-Anteil natürlich dem hier angewendeten Meßverfahren entzöge.

Der für den schnellabklingenden Strahlungsbestandteil angenommene Kernumwandlungsvorgang läßt auch eine Beziehung zu dem einen an Ruthenium beobachteten [22]) zu. Eine solche Möglichkeit wird durch die ziemlich eng zusammenliegenden, bisher ermittelten Halbwertszeiten — für Rhodium 35 bzw. 44 und für Ruthenium 40 Sekunden — nahegelegt. Sie würde in der folgenden Kerngleichung gegeben sein:

$$^{102}_{44}\mathrm{Ru} + ^{1}_{0}\mathrm{n} \rightarrow ^{103}_{44}\mathrm{Ru} \rightarrow ^{103}_{45}\mathrm{Rh} + {}_{-1}\mathrm{e}$$

$$\left| ^{103}_{45}\mathrm{Rh} + ^{1}_{0}\mathrm{n} \rightarrow ^{103}_{44}\mathrm{Ru} + ^{1}_{1}\mathrm{H}^{\uparrow} \rightarrow ^{103}_{45}\mathrm{Rh} + {}_{-1}\mathrm{e} \,(+\gamma) \right|$$

Bei dem im Anklingungsverlauf mit der Bestrahlungsdauer sichtbaren, sehr schwach vertretenen Strahlungsbestandteil des Rhodiums mit großer Halbwertszeit kann es sich um geringe Verunreinigungen durch ein Nachbarelement handeln. Und zwar käme dafür ebenfalls Ruthenium in Betracht, da die restlose Trennung der Platinmetalle nur schwer zu erreichen ist, und außerdem an ihm unter anderen auch Halbwertszeiten von 11 und 75 Stunden [22]) beobachtet worden sind.

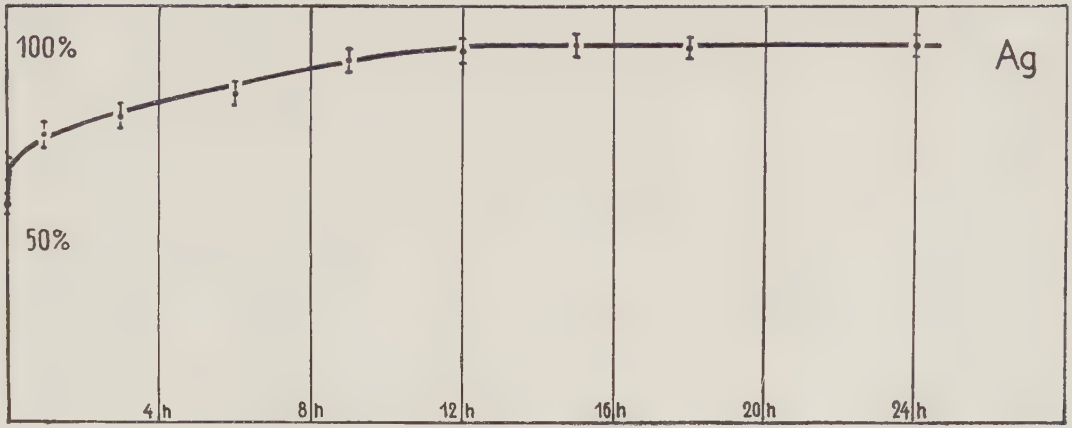

Abb. 7. Anklingungsverlauf. Ord.: Anfangsaktivität; Abs.: Bestrahlungsdauer.

Silber. Der Anklingungsverlauf der durch verschiedene Bestrahlungszeiten erhaltenen Anfangsteilchenzahlen ist in Abb. 7 wiedergegeben. Während der ersten Minuten steigt die Aktivität schnell an und erreicht dann in stetiger Zunahme bei etwa 9stündiger Bestrahlung das Gleichgewicht. Daraus ergibt sich für einen Bestandteil der Silberstrahlung eine Halbwertszeit von ungefähr 70 Minuten, über den an anderer Stelle keine Angaben gemacht werden.

Aus den Abklingungskurven wurden als kürzere Halbwertszeiten 22 Sekunden und 2,4 Minuten ermittelt. Sie befinden sich in guter Übereinstimmung mit den Angaben der meisten Forscher. So haben sich Fermi und Mitarbeiter [8] [9] [10] [15] [23] in ihren letzten Veröffentlichungen für 22 Sekunden und 2,3 Minuten entschieden, ebenso Rotblat und Zyw [24] wie Chadwick und Goldhaber [25]. Dagegen gibt Sugden [26] für die kurze Halbwertszeit noch 20 Sekunden an. Tillman und Moon [11] [12] [13], sowie Livingston u. a. [27] haben 25 Sekunden und 2,5 Minuten gefunden. Kikuchi und Mitarbeiter [28] haben aus Anfang und Ende des Abklingungsverlaufes auf 30 Sekunden und 2 Minuten nur geschätzt. Noch weiter ab liegt der Wert 40 Sekunden, den Bjerge und Westcott [29] für die kurze Halbwertszeit des Silbers angeben. Die Unterschiede zwischen allen diesen Werten sind wohl dem Grad der Genauigkeit zuzuschreiben, mit dem die Aufnahme der Zerfallskurven und ihre Zerlegung in Exponentialkurven ausgeführt wurde *). In Übers. 4 sind die Angaben über die Halbwertszeiten des Silbers zusammengestellt.

Im Gegensatz zu Rhodium war die Silberaktivität, wie Abb. 4 erkennen läßt, innerhalb der Meßgenauigkeit dem γ-Äquivalent der in der Neutronenquelle befindlichen Emana-

*) Nach Abschluß der Arbeit: Guében [Nature 138, 1095 (1936)] glaubt in Untersuchungen bezüglich der von Bjerge und Westcott gefundenen 40 s-Ag-HWZ verschiedene Umwandlungsmöglichkeiten mit Beziehung zu der kurzlebigen Rh-Anregung gefunden zu haben.

Übersicht 4.

E. Fermi und Mitarbeiter	20	sec;	2	min	[3] [6] [7]
E. Fermi und Mitarbeiter	22	sec;	2,33	min	[8] [9] [10] [15] [22]
T. Bjerge und C. H. Westcott	40	sec;			[29]
J. Chadwick und M. Goldhaber	22	sec;	2,3	min	[25]
E. R. Gaerttner u. a.	22	sec;			[16]
H. H. Goldsmith und F. Rasetti	22	sec;	2,3	min	[17]
S. Kikuchi und Mitarbeiter	30	sec;	2	min	[23]
M. S. Livingston u. a.	26 ± 4	sec;	154 ± 10	sec	[27]
P. B. Moon und J. R. Tillman	25	sec;	2,5	min	[11] [12] [13]
P. Preiswerk	20	sec;	2	min	[30]
J. Rotblat und M. Zyw	22	sec;	2,3	min	[24]
S. Sugden	20	sec;	2,33	min	[26]
H. K. Müller	22 ± 1	sec;	2,4±01	min	

tionsmenge proportional. Ob die für Rhodium angenommene Möglichkeit eines durch Verschiebung des Neutronenspektrums bedingten, veränderlichen Verhältnisses von ausgelöster Aktivität zur γ-Strahlung der Emanation hierdurch widerlegt wird, oder ob vielmehr die geringere Aktivierbarkeit des Silbers diese Erscheinung nicht erkennbar werden ließ, bleibe dahingestellt.

Durch die Beeinflussung der Neutronen mit Wasser ergaben sich die in Abb. 8 und Übers. 5 enthaltenen Veränderungen der Silberaktivitäten. Die in 22 Sekunden auf die Hälfte abklingende erreichte durch 10 cm Wasserradius den 19fachen Betrag der Aktivität bei Bestrahlung in Luft. Der längerlebige Strahlungsbestandteil ließ sich durch 8 cm Wasserradius sogar 38fach vermehren. Die Steigerung der Umwandlungswahrscheinlichkeit vollzieht sich in der gleichen Weise wie bei Rhodium, so daß auch die gleichen Begründungen Geltung haben.

Die von Fermi und Mitarbeitern [8]) an Silber ermittelten „Wasserstoffaktoren" sind für den schnellabklingenden Anteil „30" und für den langsamzerfallenden „15". Während so für das kurzlebige Silberisotop die doppelte Wirksamkeit langsamer Neutronen wie für das Isotop mit 2,3 Minuten

Halbwertszeit angegeben wird, hat sich hier gerade das umgekehrte Verhältnis ergeben. Daß die Ergebnisse verschiedener Versuchsanordnungen besonders an diesem Gegenstand sich nicht ohne weiteres vergleichen lassen, wurde

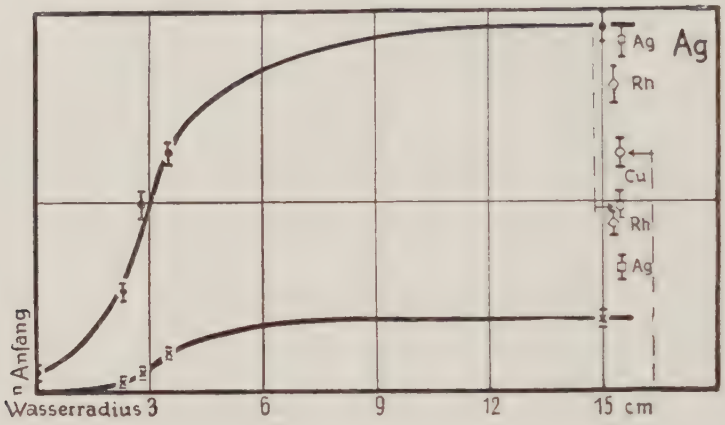

Abb. 8.
Wasserwirkung.

Übersicht 5.

Filter		Anf.-Akt.	Änderung
H_2O	— cm	10 : 1	1 : 1
	2,3 cm	52 : 4	5 : 4
	2,8 cm	98 : 9	10 : 9
	3,5 cm	125 : 20	13 : 20
	15,0 cm	193 : 38	19 : 38
+ Rh	0,026 cm	162 : 89	−16 % : +134 %
+ Ag	0,053 cm	185 : 66	− 4 % : + 73 %
+ Cu	0,052 cm	98 : 126	−50 % : +231 %

schon bei der Behandlung der Erscheinungen an Rhodium betont. Wieweit das Grundsätzliche der Anlagerungsveränderungen hiervon betroffen wird, kann in den gegebenen Grenzen nicht entschieden werden. Andererseits entspricht

unter der zulässigen [18]) Annahme gleicher Filterwirkung von Wasser und Paraffin die von Kikuchi und Mitarbeitern [28]) beobachtete Verzehnfachung der Silbergesamtaktivität bei Bestrahlung durch 3,5 cm Paraffin dem hier erhaltenen Wert. Etwas kleiner im Verhältnis zu dem dort wirksam gewesenen Wasserradius ist eine Steigerung auf das 12fache, die von Große und Agruß [31]) erhalten haben. Die Feststellung Pontecorvos [32]), daß 8 cm Wasserradius die größte Erhöhung der Silberaktivierung erbringen, läßt sich gut mit dem hier beobachteten Verlauf vereinbaren.

Die kurzlebige Aktivität war bei Gegenwart eines anderen Silberbleches $\left(0{,}053\ \text{cm}/\frac{0{,}5565\ \text{g}}{\text{cm}^2}\right)$ während der Bestrahlung um 4% kleiner als ohne dies, jedoch die längerlebige um 73% größer. Rotblat und Zyw [24]) haben dafür durch ausschließliche Filterung mit Silber in Vorwärtsanordnung eine Abnahme um 5% für die kurze und eine Zunahme um 12% für die längere festgestellt. Für die Gesamtaktivität des Silbers erhält Ehrenberg [19]) durch Bremsung der Neutronen in Silber eine Steigerung um $40 \pm 5\%$. Ein entgegengesetztes Ergebnis haben Tillman und Moon [12]) mit einer Herabsetzung beider Aktivitäten auf die Hälfte bei Silberfilterung der Neutronen. Bei der Bestrahlung in Anwesenheit eines Rhodiumbleches $\left(0{,}026\ \text{cm}/\frac{0{,}3224\ \text{g}}{\text{cm}^2}\right)$ war die Aktivität mit der 22-Sekunden-Halbwertszeit um 16% geringer; die mit der 2,4-Minuten-Halbwertszeit hingegen um 134% größer. Die Gegenwart eines Kupferbleches $\left(0{,}052\ \text{cm}/\frac{0{,}4644\ \text{g}}{\text{cm}^2}\right)$ bei der Bestrahlung ergab eine Verringerung um 50% für den schnellzerfallenden und eine Erhöhung auf 231% für den längerlebigen Bestandteil der Silberaktivität. Demgegenüber stellten Rotblat und Zyw [24]) mit in Kupfer verlangsamten Neutronen für die 22-Sekunden-Aktivität eine Steigerung um 28% und für die 2,4-Minuten-Aktivität eine von 14% fest.

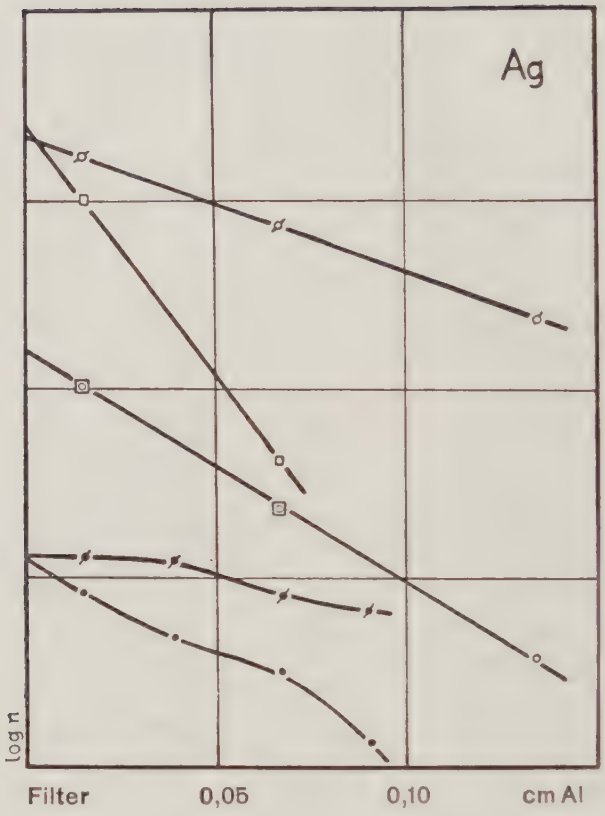

Abb. 9.

Absorption der Elektronen.

—•— u. —○— kurz
—•— u. —○— lang
mit verschiedener Neutronenquelle.

—□— kurz
—□— lang
mit Kupfer-Filter.

Andererseits geben Tillman und Moon [12]) für beide Aktivitäten eine Verminderung um 30% bei Bestrahlung durch Kupfer an.

Aus den in Abb. 9 wiedergegebenen Absorptionskurven wurde für die Teilchen des schnellen Zerfalles die mittlere Energie zu $1{,}22 \cdot 10^6$ eV bestimmt aus der Halbwertsdicke von 0,095 cm Al, entsprechend einem Absorptionskoeffizienten $\mu = 7{,}5\ \text{cm}^{-1}$ Al die Übereinstimmung mit dem von Gaerttner u. a. [16]) in der Nebelkammer mit magnetischer Zerlegung aufgenommenen Elektronenspektrum dieser Strahlung ist recht gut.

Wie bei Rhodium die Zerfallsenergie nach der Bestrahlung in Gegenwart des Silberbleches geringer war, so hat das Kupferfilter dieselbe Wirkung für die Silberstrahlung. Und zwar betrug die Energie in diesem Falle in der 22-Sekunden-Halbwertszeit nur $0{,}85 \cdot 10^6$ eV und in der 2,4-Minuten-Aktivität nur noch $0{,}36 \cdot 10^6$ eV. Die in der Silberstrahlung bestimmten Energien sind in Übers. 6 zusammengestellt.

Übersicht 6.

Zerfall	Halbwertsdicke	Abs.-Koeff.	Energie
Silber 22″	0,095 cm Al	7,5 cm^{-1} Al	$1{,}22 \cdot 10^6$ eV
(Cu)	0,058 cm Al	11,95 cm^{-1} Al	$0{,}85 \cdot 10^6$ eV
Silber 2,4′	0,058 cm Al	11,95 cm^{-1} Al	$0{,}85 \cdot 10^6$ eV
(Cu)	0,023 cm Al	30,13 cm^{-1} Al	$0{,}36 \cdot 10^6$ eV

Die Aktivitäten des Silbers entstehen wahrscheinlich durch die in folgenden zwei Gleichungen

$$^{109}_{47}\text{Ag} + ^{1}_{0}\text{n} \rightarrow ^{110}_{47}\text{Ag} \rightarrow ^{110}_{48}\text{Cd} + {}_{-}\text{e}$$

mit der kurzen und

$$^{107}_{47}\text{Ag} + ^{1}_{0}\text{n} \rightarrow ^{108}_{47}\text{Ag} \rightarrow ^{108}_{48}\text{Cd} + {}_{-}\text{e}$$

mit der langen Halbwertszeit darstellbaren Umwandlungen der beiden Isotope durch Neutronenanlagerung, wie auch

schon von Fermi [7]), Joliot und Kowarski [33]) angenommen wurde.

Gleiche Eintrittswahrscheinlichkeit kann, wenigstens bei denselben Neutronenenergien, für die beiden Umwandlungen nicht erwartet werden, was auch die Messungen bestätigen. Da wie in den meisten natürlichen Zerfallsvorgängen in der größeren Zerfallszeit eine geringere Zerfallsneigung infolge geringerer Energieumstellungen im Kern in Erscheinung tritt, ist es erklärlich, daß die hier als energieärmer festgestellten Teilchen der 2,4-Minuten-Aktivität einem energieärmeren Kernzustand entstammen. Damit kann auch das Ergebnis in Einklang gebracht werden, daß die energiereichere Umwandlung in geringerem Maße durch verlangsamte Neutronen herbeigeführt wurde als die energieärmere und durch eine weitere Verringerung der Neutronenenergie sogar an Eintrittswahrscheinlichkeit verlor, während die energieärmere noch erheblich vermehrt wurde; denn nach den theoretischen Betrachtungen Bethes [34]) ist bei der Anlagerung von Neutronen an Kerne mit Resonanzwirkungen zu rechnen.

Der im Anklingungsverlauf erkennbare Strahlungsbestandteil mit 70-Minuten-Halbwertszeit könnte einer Anregung eines Kadmiumisotopes zuzuschreiben sein, denn Fermi und Mitarbeiter [7]) haben an Kadmium unter anderen eine Halbwertszeit von 70 Minuten festgestellt.

K u p f e r. Durch Veränderung der Bestrahlungsdauer wurde die in Abb. 10 gezeigte Zunahme der Anfangsaktivität gefunden. In einem einfachen Exponentialverlauf stellt sich nach 45 Minuten Bestrahlung das Gleichgewicht ein. Es findet also nur ein Strahlungsvorgang statt mit einer Halbwertszeit von mehr als 5 Minuten, aber kaum mehr als 6 Minuten. Das gleiche Ergebnis wurde aus den Abklingungskurven erhalten mit 6,1 Minuten als Halbwertszeit. Die gelegentlich anderweitig festgestellten längeren Zerfallszeiten konnten nicht gefunden

werden. Doch ergibt sich nach kürzlich veröffentlichten Untersuchungen von Heyn [35]) und von Madsen [36]) als Ursache dafür, daß nur Neutronen bestimmter Quellen, d. h. zugleich Energiegruppen, die einzelnen Umwandlungen bewirken. So konnte Heyn mit $^2H + {}^2H$- und $Be + {}^2H$-Neutronen nur eine 6-Minuten-Halbwertszeit und mit den sehr energiereichen $Li + {}^2H$-Neutronen nur eine 10,5-Minuten-Halbwertszeit be-

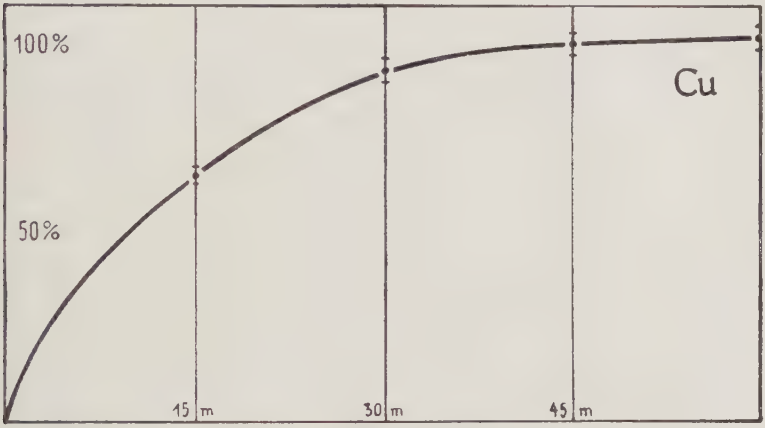

Abb. 10.
Anklingungsverlauf.
Ord.: Anfangsaktivität; Abs.: Bestrahlungsdauer.

obachten. Madsen hingegen konnte keine 5-Minuten-Halbwertszeit finden, sondern nur eine zu 17 Stunden. D'Agostino [23]), Fermi [8]), Bjerge und Westcott [37]) wiederum berichten von 10 bzw. 6 Stunden und van Voorhis [38]) von 12,8 Stunden als Halbwertszeiten der Kupferstrahlung; in letzterer sollen neben Elektronen auch Positronen auftreten. Das gleiche konnte Heyn durch magnetische Ablenkung für die 10,5-Minuten-Aktivität feststellen. Daher glaubt Madsen

an vier verschiedene Umwandlungsmöglichkeiten für dasselbe Isotop in Abhängigkeit von den jeweils einwirkenden Neutronengruppen.

Übersicht 7.

E. Fermi und Mitarbeiter	6	min;			[3] [6] [7] [15]
O. d'Agostino E. Fermi und Mitarbeiter	6	min;	10	std	[22]
M. S. Livingston u. a.	6—8	min;			[8]
P. Preiswerk	6	min;			[27]
F. A. Heyn	6	min;			[30]
	10,5	min;			[35]
E. Fermi und Mitarbeiter	5	min;	10	std	[5] [9] [10]
H. H. Goldsmith u. F. Rasetti	5	min;			[17]
P. B. Moon und J. R. Tillman	5	min;			[11] [12] [13]
P. Bjerge und C. H. Westcott			6	std	[37]
S. N. van Voorhis			12,8	std	[38]
C. B. Madsen			17	std	[36]
H. K. Müller	$6{,}1 \pm 0{,}2$	min			

Der Wert von 6 Minuten für die Halbwertszeit ist in einem Teil der Veröffentlichungen von Fermi und Mitarbeitern [3] [6] [7] [15] und bei Preiswerk [30] zu finden; von Livingston u. a. [27] wird 6—8 Minuten angegeben. In einem anderen Teil von Arbeiten aus dem Kreise Fermis [5] [9] [10] und bei Tillman und Moon [11] [12] [13] wird die Halbwertszeit der Kupferstrahlung mit 5 Minuten bemessen. Jedoch dürfte den Meßergebnissen von 6 bzw. 5 Minuten der gleiche Umwandlungsvorgang zugrundeliegen, da durch die längere Zerfallszeit und die Teilchenarmut die Genauigkeit schon beeinträchtigt wird. Die Übers. 7 enthält die verschiedenen Angaben über die an Kupfer beobachteten Halbwertszeiten.

Das Verhältnis zwischen Aktivität und γ-Äquivalenten des Emanationsinhaltes der Neutronenquelle ist auch bei Kupfer ebenso wie bei Silber, innerhalb der Meßgenauigkeit, wie Abb. 4 zeigt, während der Emanationsabklingung unverändert. Was aber hinsichtlich der geringeren Aktivierbarkeit des Silbers galt, gilt noch weit mehr für Kupfer.

Infolgedessen braucht darin noch keine Widerlegung der an die Abweichungen bei Rhodium geknüpften Überlegungen gesehen zu werden.

(Die Wasserwirkung auf die Anlagerungseigenschaften der Neutronen konnte an Kupfer nicht verfolgt werden, da eine für die verhältnismäßig geringe Kupferaktivität ausreichende Emanationsmenge nicht mehr verfügbar wurde.)

Die Bestrahlung des Kupfers in Wasser in Gegenwart eines anderen Kupferbleches $\left(0{,}052\ \text{cm}/\frac{0{,}4644\ \text{g}}{\text{cm}^2}\right)$ blieb für die Aktivität ohne merklichen Einfluß, während Tillman und Moon [12]) durch Kupferfilterung der Neutronen eine Herabsetzung der Aktivität um 28% erhielten. Die Anwesenheit eines Rhodiumbleches $\left(0{,}026\ \text{cm}/\frac{0{,}3224\ \text{g}}{\text{cm}^2}\right)$ führte zu einer Verminderung um 16%. Andererseits ergab sich eine Erhöhung von 22% für die Kupferaktivität durch Einschaltung eines Silberbleches $\left(0{,}053\ \text{cm}/\frac{0{,}5565\ \text{g}}{\text{cm}^2}\right)$ in den Strahlengang der Neutronen.

Die mittlere Energie der Kupferstrahlung wurde aus 0,0525 cm Al Halbwertsdicke, wie Abb. 11 zeigt, und einem Absorptionskoeffizienten $\mu = 13{,}20\ \text{cm}^{-1}$ Al zu $0{,}80 \cdot 10^6$ eV bestimmt.

Für den hier beobachteten Strahlungsvorgang an Kupfer mit 6-Minuten-Halbwertszeit würde mit Rücksicht auf die noch möglichen, langsameren Zerfallsvorgänge die Umwandlung

$$^{65}_{29}\text{Cu} + ^{1}_{0}\text{n} \rightarrow ^{66}_{29}\text{Cu} \rightarrow ^{66}_{30}\text{Zn} + {}_{-}\text{e}$$

anzunehmen sein und würde als Anlagerungsbildung durch Verlangsamung der Neutronen stark begünstigt werden. Tatsächlich führte Bestrahlung mit ungefilterten, d. h. ungebremsten Neutronen einer Radiumemanation-Berylliumoxyd-Neutronenquelle von 25 mg Radiumäquivalent zu keiner

meßbaren Aktivität, oder höchstens zu einer sehr langsam abklingenden und schwachen, für deren Anregung die Bestrahlungsdauer zu gering war. Dagegen ergaben sich mit einem Wasserradius von 15 cm in der ersten Minute nach Bestrahlung 60 Teilchen (ohne Rest) und durch einen zusätzlichen Silberbremsfilter eine weitere Steigerung der Aktivität. Die Verminderung bei Bestrahlung in Gegenwart des

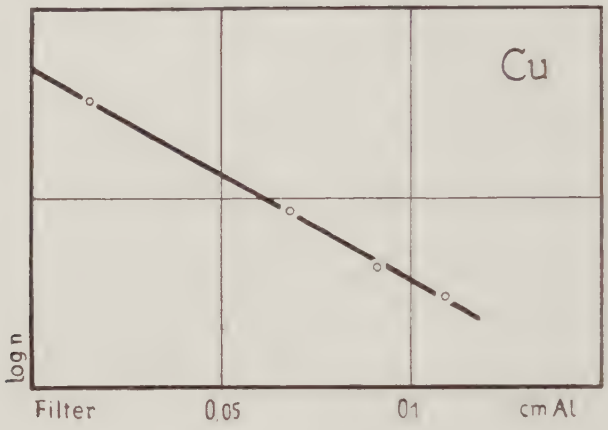

Abb. 11.
Absorption der Elektronen.

Rhodiumfilters ist die gleiche wie für den kurzlebigen Silberbestandteil und scheint im wesentlichen von Rhodium aus bestimmt zu sein.

Alle hier ausgeführten Messungen bestätigen mit ihren Ergebnissen die Begünstigung der einzelnen Kernumwandlungsvorgänge entsprechend den in ihnen sich vollziehenden Energieumsetzungen durch Einwirkung von Neutronen bestimmter Energie. Diese Erscheinungen sind anderweitig schon in mannigfachem Zusammenhang beobachtet worden

und mit „Absorptionsbanden“ [39]) der Kerne für das Energiespektrum der Neutronen oder als „selektive“ [13]) [40]) Absorption gekennzeichnet worden. Gleichzeitig wird aber deutlich, daß diese Wirkungen nicht die Schärfe der ähnlichen optischen Erscheinungen haben, ja gemäß dem Wesen der Neutronen als Teilchenstrahlung gar nicht haben können, und daß infolgedessen Collin [41]), Frisch u. a. [42]) in ihren Versuchen mit der Nebelkammer eine „selektive“ Absorption der Neutronen nicht wahrnehmen konnten.

Zusammenfassung*).

Es werden mit einem Zählrohr Beziehungen zwischen Neutroneneinwirkung mit einer Radium- und einer Emanation + Berylliumoxyd-Neutronenquelle und künstlicher Radioaktivität an Rhodium, Silber und Kupfer untersucht.

1. Durch Änderung der Bestrahlungszeit werden Anklingungskurven aufgenommen; aus ihnen ergibt sich als größte Halbwertszeit für Rhodium die Größenordnung eines Tages, für Silber etwa 70 Minuten und für Kupfer 6 Minuten. — Aus den Abklingungskurven werden als kürzere Halbwertszeiten bestimmt für Rhodium 35 Sekunden und 3,8 Minuten, für Silber 22 Sekunden und 2,4 Minuten und für Kupfer 6,1 Minuten.

2. Das γ-Äquivalent des Emanationsinhaltes der einen Neutronenquelle wird in Beziehung gebracht zu den während der Emanationsabklingung erhaltenen Aktivitäten. Bei Rhodium zeigt sich diese Beziehung veränderlich, während bei Silber und Kupfer, vielleicht infolge der geringeren Aktivität, dies nicht erkennbar ist.

---

*) Über die wichtigsten Ergebnisse wurde schon berichtet in *„den Naturwissenschaften“*.

3. Die Filterung der Neutronen durch Wasser bringt für Rhodium = 35″ 25fache, für Rhodium = 3,8′ 37fache, für Silber = 22″ 19fache und für Silber = 2,4′ 38fache Aktivität gegenüber Bestrahlung in Luft. Durch die Gegenwart anderer Bleche ergeben sich teils weitere Steigerung, teils Verminderung.

4. Die Energie der Zerfallsteilchen wird für Rhodium = 35″ zu 0,80, für Rhodium = 3,8′ zu 1,59, für Silber = 22″ zu 1,22, für Silber = 2,4′ zu 0,85 und für Kupfer zu 0,80 MeV bestimmt. Da diese auf den Energieumsetzungen in den Zerfallsvorgängen beruht, gestattet sie Schlüsse auf jene zu ziehen. Es werden Annahmen über die möglichen vorliegenden Kernvorgänge dargelegt.

Abschließend bringe ich meinem verehrten Lehrer Herrn Professor Dr. G. Hoffmann meinen aufrichtigsten Dank zum Ausdruck für die Anregung dieser Arbeit und ihre wohlwollende Förderung, besonders auch durch die Beschaffung der Radium-Neutronenquelle. Ebenfalls danke ich Herrn Professor Dr. K. Ziegler für sein Interesse an den Ergebnissen der Arbeit. Für seine stete Hilfsbereitschaft habe ich Herrn Dr. habil. W. Messerschmidt besonders zu danken.

Aus dem Institut für Experimentalphysik der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg.

Schrifttum.

[1]) I. Curie u. F. Joliot, C. R. 198, 254 (1934) / Phys. Ber. 15, 666.
[2]) E. Fermi u. a., Ric. sci. 5 (1), 283 (1934).
[3]) E. Fermi, Nature 133, 757 (1934).
[4]) E. Fermi, Nature 133, 898 (1934).
[5]) R. Döpel, Phys. Zs. 37, 96 (1936).
[6]) E. Amaldi u. a., Ric. sci. 5 (2), 467 (1934) / Phys. Ber. 16, 1701.
[7]) E. Fermi u. a., Proc. Roy. Soc., London (A) 146, 483 (1934).
[8]) E. Amaldi u. a., Proc. Roy. Soc., London (A) 149, 522 (1935).
[9]) E. Fermi u. F. Rasetti, Cim. (N.S.) 12, 201 (1935) / Phys. Ber. 16, 1910.
[10]) F. Rasetti u. G. A. Fink, Phys. Rev. (2) 49, 642 (1936).
[11]) P. B. Moon u. J. R. Tillman, Nature 135, 904 (1935).
[12]) J. R. Tillman u. P. B. Moon, Nature 136, 66 (1935).
[13]) P. B. Moon u. J. R. Tillman, Proc. Roy. Soc., London (A) 153, 476 (1936).
[14]) E. Amaldi u. a., Cim. (N. S.) 11, 442 (1934) / Phys. Ber. 16, 321.
[15]) E. Amaldi u. a., Ric. sci. 6 (1), 123 (1935) / Phys. Ber. 16, 1702.
[16]) E. R. Gaerttner u. a., Phys. Rev. (2) 49, 793 (1936).
[17]) H. H. Goldsmith u. F. Rasetti, Phys. Rev. (2) 50, 328 (1936).
[18]) R. Fleischmann, Zs. f. Phys. 97, 242 (1935).
[19]) W. Ehrenberg, Nature 136, 870 (1935).
[20]) C. B. Madsen, Nature 138, 722 (1936).
[21]) L. Szilard u. T. A. Chalmers, Nature 135, 98 (1935).
[22]) Ig. Kourtschatov u. a., C. R. 200, 2162 (1935) / Phys. Ber. 16, 2178.
[23]) O. d'Agostino, Gazz. chim. ital. 65, 1071 (1935) / Phys. Ber. 17, 1256.
[24]) J. Rotblat u. M. Zyw, Nature 137, 185 (1936).
[25]) J. Chadwick u. M. Goldhaber, Proc. Roy. Soc., Lond. (A) 151, 479 (1936).
[26]) S. Sugden, Nature 135, 469 (1935).
[27]) M. S. Livingston u. a., Phys. Rev. (2) 46, 325 (1934).
[28]) S. Kikuchi u. a., Nature 135, 905 (1935).
[29]) T. Bjerge u. C. H. Westcott, Nature 134, 177 (1934).
[30]) P. Preiswerk, C. R. 200, 827 (1935) / Phys. Ber. 16, 1411.

[31]) A. v. Große u. M. S. Agruß, Phys. Rev. (2) 47, 91 (1935).
[32]) Br. Pontecorvo, Cim. (N. S.) 12, 211 (1935) / Phys. Ber. 16, 1911.
[33]) F. Joliot u. L. Kowarski, C. R. 200, 824 (1935) / Phys. Ber. 16, 1785.
[34]) H. A. Bethe, Phys. Rev. (2) 47, 747 (1935).
[35]) F. A. Heyn, Nature 138, 723 (1936).
[36]) C. B. Madsen, Nature 138, 722 (1936).
[37]) T. Bjerge u. C. H. Westcott, Nature 134, 286 (1934).
[38]) S. N. van Voorhis, Phys. Rev. (2) 49, 876 (1936).
[39]) Br. Pontecorvo, Ric. sci. 6 (2), 145 (1935) / Phys. Ber. 17, 628.
[40]) L. Szilard, Nature 136, 950 (1935).
[41]) C. H. Collin, Nature 137, 614 (1936).
[42]) O. R. Frisch u. a., Nature 137, 149 (1936).

Lebenslauf.

Am 27. September 1910 bin ich, Hans Karl Müller, zu Halle (Saale) geboren als Sohn des verstorbenen Professor Dr. phil. Hans Carl Müller, weiland Direktor der Agrikulturchemischen Kontrollstation und der Versuchsstation für Pflanzenschutz, und der Charlotte geb. Teudeloff. Mit sieben Jahren trat ich in die Vorschule am Stadtgymnasium in Halle ein, drei Jahre später in das Gymnasium selbst. Nach der Reifeprüfung widmete ich mich an der Universität Halle dem Studium der Naturwissenschaften. Praktisch gearbeitet habe ich im Institut für Experimentalphysik, im Chemischen, im Physikalisch-chemischen und im Photographischen Institut.

Allen meinen Lehrern stete Dankbarkeit zu versichern, habe ich ehrenvollen Anlaß.